



ДМИТРИЕВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ОЧИСТКА КРУПНОТОННАЖНЫХ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ В ВИХРЕВЫХ АППАРАТАХ
ПУТЕМ ФИЗИЧЕСКОЙ И ХИМИЧЕСКОЙ СОРБЦИИ**

05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Казань – 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Научный консультант доктор технических наук, профессор
Николаев Андрей Николаевич.

Официальные оппоненты: Войнов Николай Александрович,
доктор технических наук, профессор,
ГОУ ВПО «Сибирский государственный
технологический университет», профессор
кафедры машин и аппаратов промышленных
технологий;

Шарафутдинов Валерий Фахруллович,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский)
федеральный университет», профессор кафедры
моделирования экологических систем;

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КФУ



0000801662

Теляков Эдуард Шархиевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Казанский национальный
исследовательский технологический университет»,
профессор кафедры машин и аппаратов
химических производств.

Ведущая организация ГОУ ВПО «Самарский государственный
технический университет» г. Самара

Защита состоится 23 марта 2012 г. в 14 часов 00 мин. на заседании
диссертационного совета Д 212.080.06 при Казанском национальном
исследовательском технологическом университете по адресу: г. Казань,
ул. Карла Маркса, 68, зал заседаний Ученого совета (А-330).

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный гербовой печатью,
просим направлять по адресу: 420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68,
Казанский национальный исследовательский технологический университет,
ученому секретарю диссертационного совета Д 212.080.06.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского
национального исследовательского технологического университета.

Автореферат разослан «13» февраля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.080.06,
доктор технических наук, профессор

С.И. Поникиров

Актуальность работы. В настоящее время остро стоит проблема очистки крупнотоннажных газовых выбросов химических, нефтехимических и смежных с ними промышленных предприятий от химически и экологически вредных примесей, в том числе – парниковых газов (диоксид углерода, углеводороды, окислы азота и др.). Такая ситуация предполагает разработку в самые кратчайшие сроки эффективных методов очистки газовых выбросов предприятий от химически и экологически опасных компонентов. Поэтому весьма актуальной задачей является разработка технологических процессов очистки газовых выбросов от вредных газообразных компонентов, а также от тонкодисперсных твердых взвесей.

В ряде случаев объем газообразных выбросов превышает миллион кубометров в час. В качестве абсорберов, как правило, применяется традиционное оборудование барботажного тарельчатого и насадочного типов. Однако такое абсорбционное оборудование устойчиво работает при скоростях газа, не превышающих 1,5-2 м/с. При очистке больших объемов газов это приводит к необходимости увеличения габаритных размеров оборудования или использования большого количества параллельно работающих аппаратов.

Перспективным типом аппаратов, позволяющих обеспечить эффективную очистку, являются вихревые аппараты, обладающие высокой пропускной способностью, малыми габаритами и низким гидравлическим сопротивлением. Кроме того, использование физической сорбции для очистки газовых выбросов промышленных предприятий от наиболее распространенных вредных примесей непродуктивно, так как эффективность очистки не превышает 50%, что в принципе не приемлемо на практике. Повысить эффективность очистки возможно только при использовании правильно подобранных хемосорбентов.

Исследования, представленные в диссертации, выполнены в соответствии с государственными контрактами № 02.740.11.0062, № 02.740.11.0753, № 02.740.11.0685 на выполнение научно-исследовательских работ, заключенных в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 г. в рамках мероприятия 1.1; договором № 02.120.322-МК об использовании гранта президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых на выполнение научно-исследовательских работ по теме «Разработка и внедрение в действующие производства контактных массообменных устройств для увеличения производительности колонных аппаратов».

Цель работы и основные задачи исследования. Разработка эффективных процессов и аппаратов вихревого типа для очистки газовых выбросов промышленных предприятий путем физической и химической сорбции, теоретические и экспериментальные исследования гидродинамики и массообмена, осложненного химической реакцией в вихревых аппаратах.

В непосредственные задачи исследования входило:

1) На основе анализа недостатков существующих аппаратов вихревого типа, предназначенных для очистки газовых выбросов промышленных предприятий при протекании хемосорбционных процессов, разработка новых конструкций,

сочетающих в себе высокую производительность, малое гидравлическое сопротивление и высокую эффективность массообмена;

2) исследование гидрогазодинамики в разработанных автором аппаратах вихревого типа для повышения эффективности и надежности их работы;

3) разработка устройств распределения жидкости в объеме вихревого аппарата, теоретическое и экспериментальное исследование влияния конструктивных и технологических параметров на их работу, для создания оптимальных условий взаимодействия жидкой и газовой фаз в широком диапазоне нагрузок;

4) теоретическое и экспериментальное исследование закономерностей процессов физической и химической сорбции при комплексной очистке газовых выбросов в аппаратах вихревого типа;

5) исследование влияния удара капель о пленку жидкости на массоперенос;

6) разработка методики расчета созданных аппаратов вихревого типа и выбор оптимальных технологических и конструктивных параметров, позволяющих эффективно обрабатывать газовые выбросы;

7) создание методики расчёта эффективности очистки газов от тонкодисперсной твердой взвеси с учётом турбулентной миграции для аппаратов вихревого типа с предложенным диспергирующим устройством;

8) разработка технологий комплексной очистки газовых выбросов с аппаратами вихревого типа для оптимальной их работы.

Научная новизна работы.

1) Исследован дисперсный состав жидкости, распыленной пневмогидравлическим разбрызгивающим устройством, в зависимости от различных его конструктивных параметров и нагрузок по газу и жидкости.

2) Выполнен комплекс теоретических исследований динамики двухфазного газожидкостного потока в полых вихревых аппаратах с пневмогидравлическими разбрызгивающими устройствами.

3) Выполнены экспериментальные исследования разработанных конструкций вихревых аппаратов. Получены данные по гидравлическому сопротивлению, коэффициентам массоотдачи и эффективности аппаратов.

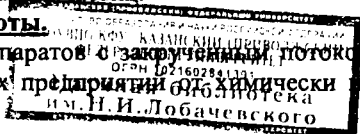
4) Разработано математическое описание процесса хемосорбционной очистки газовых выбросов в аппаратах вихревого типа, в частности очистки от диоксида углерода водным раствором *MDEA* и от диоксида серы водным раствором извести.

5) В результате теоретических и экспериментальных исследований получены зависимости для расчета коэффициента массопередачи от газа к пленке жидкости, учитывающие взаимодействие капель с пленкой в полых вихревых аппаратах и прямоточно-вихревых контактных устройствах.

6) Разработано математическое описание улавливания твердых взвешенных частиц в вихревых аппаратах с пневмогидравлическим распылением жидкости, учитывающее турбулентную миграцию частиц.

Практическое значение работы.

1) Разработаны конструкции аппаратов для очистки газовых выбросов промышленных предприятий от экологически



опасных компонентов (патенты РФ № 68480, № 76576, № 77670, № 78690, № 83713, № 84254, № 87103, № 87923, № 87923, № 87924, № 88283, № 89000, № 88999, № 89824, № 96786, № 99339, № 101792, № 102309, № 102984), обладающих большой пропускной способностью по газовой фазе, низким гидравлическим сопротивлением и малыми капитальными затратами.

2) Разработана инженерная методика проектирования и расчета вихревых аппаратов, обеспечивающая заданную степень очистки промышленных газов от химически и экологически опасных компонентов.

3) Представлен анализ методов очистки газовых выбросов от диоксида углерода; показана наибольшая экономическая целесообразность двухступенчатой очистки газовых выбросов водным раствором *MDEA*.

4) Представлен анализ методов очистки газовых выбросов от диоксида серы; показана наибольшая экономическая целесообразность очистки газовых выбросов водным раствором извести.

5) Предложенные конструкции вихревых аппаратов приняты к внедрению на ОАО «Нижнекамскнефтехим» г. Нижнекамск, ООО «СафПласт» г. Казань, ЗАО «Полимализ» г. Елабуга, ООО «ПромКомплект» г. Нижнекамск, ООО «Татнефть-Пресскомпозит» г. Елабуга с целью повышения эффективности обработки газовых выбросов на существующих производствах в аппаратах вихревого типа.

На защиту выносятся:

1) Результаты теоретического и экспериментального исследований дисперсного состава жидкости, распыленной пневмогидравлическим разбрызгивающим устройством в зависимости от различных его конструктивных параметров и нагрузок по газу и жидкости.

2) Способ поддержания вихревой структуры газожидкостного потока в вихревых аппаратах.

3) Комплекс теоретических исследований динамики двухфазного газожидкостного потока в полых вихревых аппаратах с разбрызгивающими устройствами.

4) Математическое описание процесса очистки газовых выбросов в аппаратах вихревого типа путем физической и химической сорбции.

5) Результаты экспериментальных исследований эффективности физической и химической сорбции в разработанных аппаратах вихревого типа.

6) Зависимости для расчета коэффициента массопередачи, учитывающие взаимодействие капель жидкости с пленкой в полых вихревых аппаратах и прямоточно-вихревых контактных устройствах.

7) Математическое описание улавливания твердых взвешенных частиц в вихревых аппаратах с пневмогидравлическим распылением жидкости, учитывающее турбулентную миграцию.

Личное участие. Все результаты работы получены Дмитриевым А.В. при консультации д.т.н., профессора Николаева А.Н.

Апробация работы. Основные положения и отдельные результаты докладывались и обсуждались на 18-ой международной конференции «Математические методы в технике и технологиях», г. Казань, 2005;

IV mezinárodní vědecko – praktická conference “Věda a technologie: krok do budoucnosti - 2008”, Praha, 2008; V-й Международной научно-технической конференции «Наука, образование, производство в решении экологических проблем (Экология-2008)», г. Уфа, 2008; Международной научно-практической конференции «Инженерные системы – 2009», г. Москва, 2009; международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-22», Псков, 2009; IX-й Международной конференции молодых ученых «Пищевые технологии и биотехнологии», г. Казань, 2008; Второй Всероссийской студенческой научно-технической конференции «Интенсификация тепло-массообменных процессов, промышленная безопасность и экология», г. Казань, 2008; X международной конференции молодых ученых «Пищевые технологии и биотехнологии», г. Казань, 2009; международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-23», г. Саратов, 2010; X Международной научно-практической конференции «Экология и ресурсо- и энергосберегающие технологии на предприятиях народного хозяйства», г. Пенза, 2010; XXXIX международной научно-практической конференции. Инженерно-технические науки, г. Санкт-Петербург, 2010; всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Проблемы безопасности и защиты населения и территорий от ЧС (Безопасность – 2011)», г. Уфа, 2011; международной научной конференции «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-24», г. Киев, 2011.

Автор является соруководителем 3 защищенных кандидатских диссертационных работ по специальности «Процессы и аппараты химических технологий».

Публикация работы. По материалам диссертации опубликовано 102 печатных работы, в том числе 2 монографии, 47 статей в изданиях по перечню ВАК, 18 патентов на полезные модели, 12 докладов на международных конференциях, 7 депонированных рукописей.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 8 глав, содержащих основные результаты исследования, выводов по работе и списка литературы, включающего 355 источников. Работа изложена на 287 страницах, содержит 133 рисунка и 19 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлен анализ параметров работы аппаратов для «мокрой» очистки газов с сильным взаимодействием фаз, который позволил создать схему выбора вихревых аппаратов для очистки крупнотоннажных газовых выбросов промышленных предприятий с учетом их технологических особенностей.

В настоящее время известно большое количество конструктивных вариантов вихревых аппаратов. Одни обладают высокой удельной пропускной способностью по газу, другие – по жидкости, третьи предназначены для систем с повышенным содержанием твердой фазы, четвертые могут работать на очень пенящихся жидкостях.

Аппараты вихревого типа могут быть использованы для процессов с

высокими температурами, давлениями и агрессивными средами, так как их можно изготовить из любых материалов. При вводе жидкости в вихревых аппаратах образуется факел распыла из капель жидкости. Поток газа пронизывает этот факел и интенсивно взаимодействует с жидкостью. Под действием центробежной силы жидкость осаждается на стенке контактного устройства и движется по нему в виде пленки, создавая дополнительную зону контакта с газовой фазой.

Часто газовые выбросы содержат труднорастворимые газовые примеси, для извлечения которых необходимо достаточно большое время контакта. В подобных случаях целесообразно использовать вихревой аппарат с двумя зонами контакта [патент РФ № 87924]. Время контакта газа и жидкости в аппарате увеличивается, так как увеличивается длина пути жидкости по спиральной ленте при постоянной высоте аппарата. Кроме того, увеличивается массообменная эффективность аппарата, так как в первой зоне контакта свежий газ контактирует с отработанной жидкостью, а во второй – свежая жидкость контактирует с прореагировавшим газом.

С увеличением времени контакта уменьшается относительная скорость обтекания капли, что приводит к уменьшению числа Рейнольдса и уменьшению коэффициента массоотдачи в газовой фазе. С другой стороны, увеличение продолжительности контакта вызывает снижение коэффициента массоотдачи в жидкости. Малое время пребывания газовой и жидкой фаз дает возможность обрабатывать пожаро- и взрывоопасные смеси. В том случае, когда длина аппарата, определяемая, в том числе и потерей крутки потока, недостаточна для обеспечения заданной степени очистки, аппарат может быть составлен из двух и более ступеней, обеспечивающих дополнительную закрутку газового потока, а также отвод жидкости, насыщенной извлекаемым компонентом. Кроме того, многоэлементные контактные ступени обеспечивают равномерное распределение потоков по сечению аппарата и позволяют создавать аппараты требуемой производительности для очистки газовых выбросов без твердых примесей, с большой концентрацией газовых компонентов.

В некоторых технологических процессах, например при пневмотранспорте полимеров, образуется значительное количество мелкой пыли, которая не улавливается типовыми циклонами и находится в постоянном беспорядочном движении в воздухе. Улавливание таких частиц возможно в полых вихревых аппаратах с разбрызгиванием жидкости [патент РФ № 102309]. Однако, в большинстве случаев, уловленные частицы вторично перерабатываются, а на извлечение их из воды потребуются фильтры или флотаторы, сушильные камеры или другое сложное и энергоемкое оборудование. Наиболее эффективным в этом случае для улавливания мелкодисперсных частиц будет полый вихревой аппарат для улавливания частиц из газовых потоков [патент РФ № 88999].

Полые вихревые аппараты эффективно работают при отношении массовых расходов жидкой и газовой фаз $L_m/G_m < 3$. Однако во многих массообменных процессах, в частности абсорбции с высоким значением константы фазового равновесия, $L_m/G_m > 3$. Для таких процессов, а также для процессов десорбции,

целесообразно использовать пленочный аппарат с закручиванием потоков [патент РФ № 82132]. Контактное устройство представляет собой систему консольно закрепленных на центральной стойке под определенным углом, профилированных пластин, образующих нисходящую спираль, подобную винтовой лестнице. Такая конструкция аппарата приводит к образованию сложноорганизованного противоточного движения восходящего закрученного потока газа и нисходящего закрученного потока жидкости. В результате происходит образование большой поверхности контакта фаз, интенсивное перемешивание самих потоков жидкости и газа, что, в конечном счете, способствует интенсивному массообмену, что позволяет использовать пленочный аппарат для очистки запыленных выбросов, с большой концентрацией газовых компонентов.

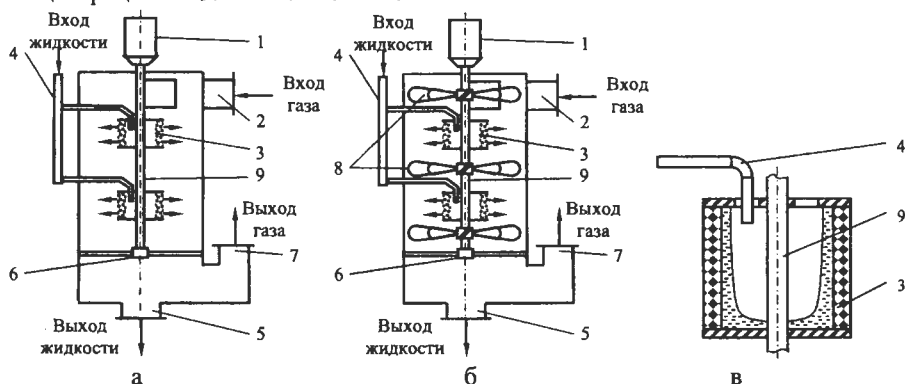


Рис. 1. Полые вихревые аппараты с пористыми вращающимися распылителями [патенты № 76576 и № 84254]: 1 – двигатель; 2 – штуцер для входа газа; 3 – пористые вращающиеся распылители; 4 – распределительное устройство; 5 – штуцер для выхода абсорбента; 6 – опора подвесного вала

При конструировании вихревых контактных аппаратов следует добиваться тонкого диспергирования жидкости, поскольку эффект увеличения удельной поверхности преобладает над эффектом уменьшения продолжения контакта. Массообмен через поверхность капель наиболее эффективно протекает в тангенциальных завихрителях. В них время пребывания капель намного больше, чем в аппаратах с осевым завихрителем. Поверхность контакта фаз может быть создана в свободном объеме, без затрат металла на контактные патрубки. Чем выше удельный расход жидкости на единицу обрабатываемого газа, тем значительнее достоинство вихревых аппаратов, поскольку поверхность контакта пропорциональна расходу жидкости. Однако при распыливании жидкости образуется значительное количество «микрокапель», которые насыщаются поглощаемым компонентом и уносятся из аппарата вместе с газовым потоком. В результате эффективность аппарата снижается и увеличивается потеря сорбента, что недопустимо в случае использования дорогостоящего или токсичного хемосорбента. Для подобных случаев, а также газовых выбросов с низким остаточным давлением, наиболее подходит вихревой аппарат с пористыми

вращающимися распылителями [патент РФ № 76576 и № 84254] (рис. 1).

При вращении вала, с пористых вращающихся распылителей срывается монодисперсный поток капель, который, попав в закрученный поток газа, двигаясь к стенке аппарата, контактирует с газовым потоком. Для низконапорных газовых выбросов в аппарате с пористыми вращающимися распылителями могут быть установлены лопасти. При вращении лопасти сообщают энергию потоку газа и перемещают его по высоте аппарата. Кроме того, они увеличивают тангенциальную скорость газа, поддерживая тем самым закрутку потока по высоте аппарата постоянной. Если энергия, переданная лопастями газовому потоку, превышает энергию, которую поток газа теряет на трение и местные сопротивления, то гидравлическое сопротивление аппарата будет отрицательным, что позволит перекачивать обрабатываемый газ с помощью этого же аппарата. Вращение лопастей создаст осевую силу, которая направлена в обратную сторону силе тяжести вала с пористыми вращающимися распылителями, что снижает нагрузку на опору и двигатель.

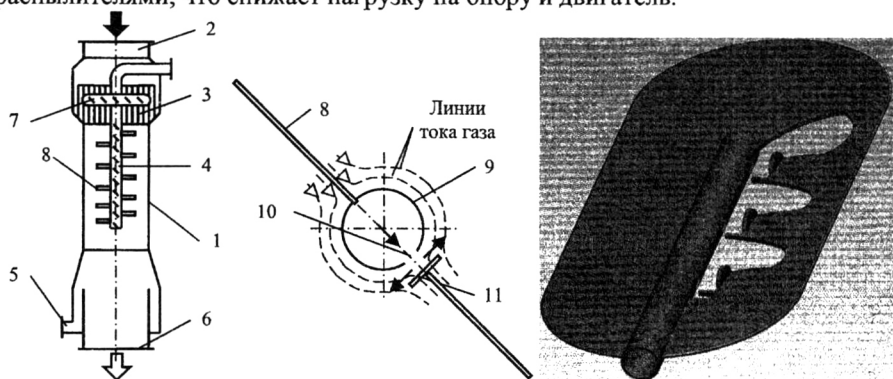


Рис. 2. Конструкция вихревого аппарата с ударными пневмогидравлическими распылителями [патент РФ № 102309]: 1 – корпус; 2 – штуцер для входа газа; 3 – завихритель; 4 – центральная труба; 5 – штуцер для выхода жидкости; 6 – штуцер для выхода газа; 7 – ороситель завихрителя; 8 – лопасти; 9 – патрубки; 10 – отверстия; 11 – диски

Отсутствие в некоторых предлагаемых конструкциях движущихся внутренних устройств и сложного в обслуживании привода повышает надежность и ремонтпригодность аппаратов. Примером такой конструкции может стать вихревой аппарат с ударными пневмогидравлическими распылителями для очистки запыленных газов с легкорастворимыми компонентами (рис. 2). Комбинирование гидравлического и пневматического способов позволяет получить требуемый распыл при небольших затратах энергии. Жидкость подается в патрубки, которые расположены на расстоянии друг от друга по всей высоте трубы. Патрубки имеют отверстия, образующие и направляющие струи жидкости на диски, при столкновении с которыми образуется пленка жидкости, распадающаяся на капли в газовом потоке. Образующиеся капли двигаются практически перпендикулярно потоку газа, благодаря чему происходит их вторичное дробление.

Для процессов с большим расходом газовой фазы и низким расходом жидкой, например, очистка газовых выбросов от твердых механических примесей с небольшой концентрацией газовых компонентов, целесообразно использовать вихревые камеры. Полые вихревые аппараты можно использовать для мембранного разделения газов, например водородосодержащих газов на палладиевых мембранах [патенты РФ № 78690 и № 83713]. Для очистки высокотемпературных газов можно использовать вихревой аппарат с охлаждающими ребрами [патент РФ № 88283], в котором хладагент поддерживает минимальную температуру стекающей пленки абсорбента и препятствует ее испарению. Кроме того, существуют конструкции вихревых аппаратов для рекуперации паров легколетучих веществ [патент РФ № 684480 и № 82201] для снижения потерь легкоиспаряющихся жидкостей из резервуаров и уменьшения их выбросов в окружающую среду при их заполнении.

Во второй главе рассмотрена газодинамика в аппаратах вихревого типа.

Для исследования характеристик работы предлагаемых вихревых аппаратов были спроектированы и построены экспериментальные установки (рис. 3, 4).

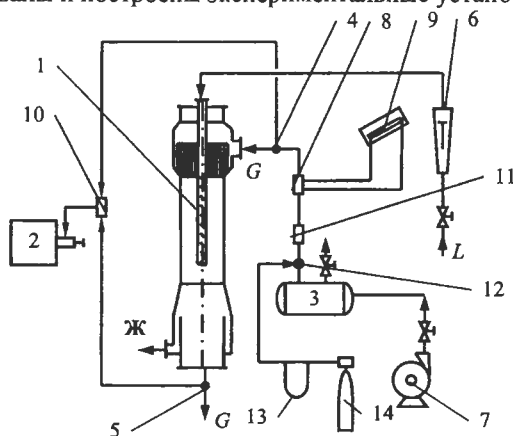


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 – аппарат вихревого типа; 2 – хроматограф; 3 – ресивер; 4, 5 – проботборники; 6 – ротаметр; 7 – компрессор; 8 – трубка Пито-Прандтля; 9 – наклонный дифференциальный манометр; 10 – кран распределитель; 11 – регулятор температуры; 12 – ввод диоксида серы; 13 – дифманометр; 14 – баллон с диоксидом серы

Исследуемая конструкция представляет собой прямоточно-вихревое контактное устройство с циклонным завихрителем, внутренний диаметр контактного патрубка которого 75 мм, длина контактного патрубка – 270 мм, радиус полуцилиндра циклонного завихрителя – 100 мм, размеры щелей циклонного завихрителя – 25×80 мм, степень крутки газового потока – 1. Высота зоны сепарации – 130 мм. На одной половине контактного патрубка по всей длине врезано смотровое стекло, таким образом, чтобы не нарушалась кривизна контактного патрубка. На внутреннюю поверхность контактного патрубка у смотрового стекла с шагом 30-35 мм наклеены неупругие непромокаемые нити.

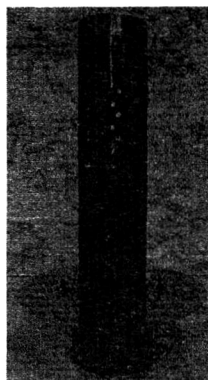
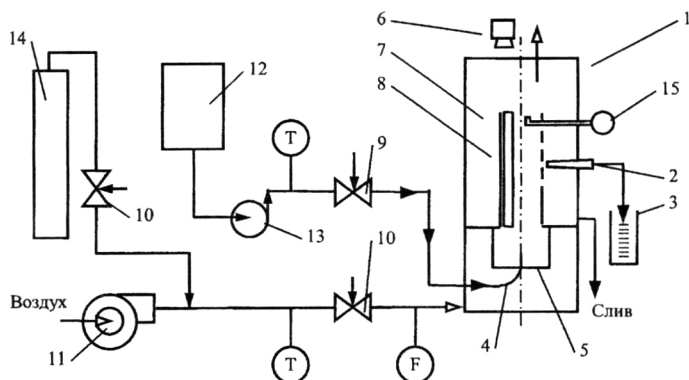


Рис. 4. Схема экспериментальной установки и внешний вид контактного устройства с односторонней сепарацией: 1 – корпус; 2 – коническая трубка; 3 – мерная емкость; 4 – узел подвода жидкости; 5 – циклонный завихритель; 6 – фотоаппарат; 7 – контактный патрубок; 8 – окно; 9, 10 – вентили; 11 – вентилятор высокого давления; 12 – емкость с абсорбентом; 13 – насос; 14 – баллон с диоксидом углерода; 15 – пробоотборник. Места измерения параметров воздуха и воды: F – расход; T – температура

Фотографическим методом определялись параметры течения жидкой фазы в контактном патрубке: при фотографировании сверху – параметры пленочного течения и уноса жидкости, эффективность работы сепарационного устройства; при фотографировании через смотровое стекло – угол течения пленки жидкости (по отклонению нитей). Фотографирование осуществлялось фотоаппаратом фирмы SONY модель – DSC-H9, разрешающая способность 8,1 млн. точек, время срабатывания затвора 1/2000 сек. Скорость потока газа в подводящей трубе определялась с помощью трубки Пито-Прандтля, подключенной к многодиапазонному микроманометру ММН-2400, класса точности 1,0.

В третьей главе рассмотрена дисперсность капель в аппаратах вихревого типа.

При ударе струи жидкости о препятствие формируется круглая пленка, внешней границей которой служит относительно толстый жидкий тор, с поверхности которого срываются радиально направленные струйки, распадающиеся на капли.

Результаты наблюдений показывают, что удар струи жидкости о препятствие может быть представлен как сумма простейших движений: радиального растекания тонкой пленки, осесимметричного и не осесимметричного движения волн.

Движение плоского элемента воды в пленке происходит с постоянной скоростью, т.к. суммарная поверхностная сила, приложенная к границе произвольного плоского элемента, равна нулю.

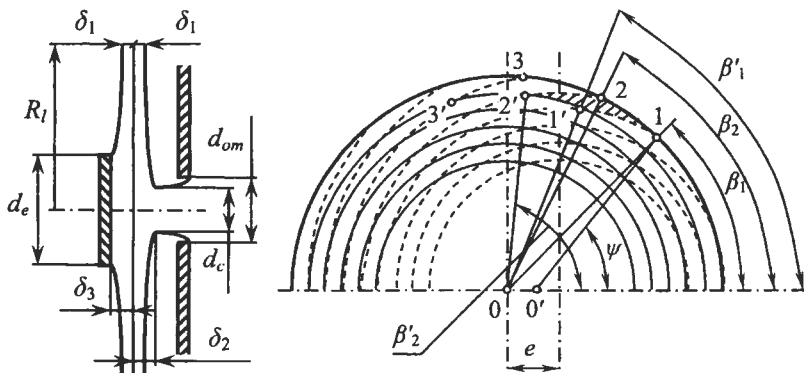


Рис. 5. Расчетная схема для определения радиуса пленки и диаметра обтекающихся капель

Уравнение для расчета радиуса пленки

$$\rho_L \frac{U_{om}}{U_n} \frac{\pi d_0^2}{16} (4R_l - d_e - \sqrt{\epsilon} d_0) \left(\frac{U_{om}}{\epsilon} \right)^2 = \sigma S_l, \quad (1)$$

где $\delta_1 = d_0^2 / (8R_l) U_{om} / U_n$; $\delta_2 = d_0^2 / (4\epsilon^{0.5}) U_{om} / U_n$; $\delta_3 = d_0^2 / (4d_e) U_{om} / U_n$; $\epsilon = (d_c / d_{om})^2$ – степень сжатия струи.

Площадь пленки можно определить по уравнению:

$$S_l = \frac{\pi d_{om}^2 U_{om}}{4 U_n} \left(\int_{\delta_1}^{\delta_2} \frac{1}{\delta} \sqrt{1 + \left(\frac{d_0^2 U_{om}}{8 U_n \delta^2} \right)^2} d\delta + \int_{\delta_1}^{\delta_3} \frac{1}{\delta} \sqrt{1 + \left(\frac{d_0^2 U_{om}}{8 U_n \delta^2} \right)^2} d\delta \right). \quad (2)$$

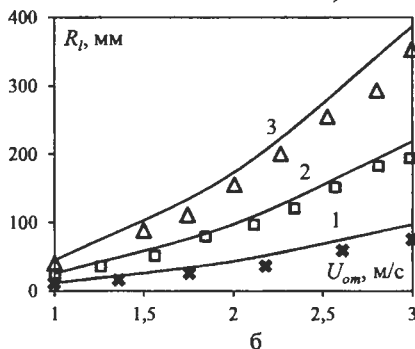
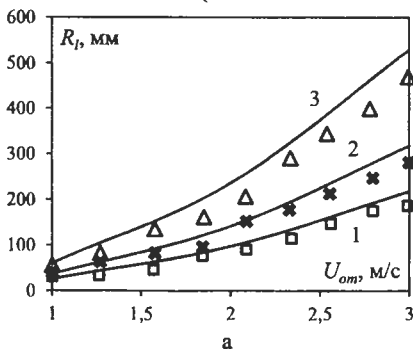


Рис. 6. Зависимости радиуса пленки от скорости жидкости в отверстии а) $d_{om} = 3$ мм; σ , Н/м: 1 - $73 \cdot 10^{-3}$; 2 - $50 \cdot 10^{-3}$; 3 - $30 \cdot 10^{-3}$; б) $\sigma = 73 \cdot 10^{-3}$ Н/м; d_{om} , мм: 1 - 2; 2 - 3; 3 - 4

Сопоставление данных, полученных по формуле (1), с экспериментальными показывает их хорошую сходимость (рис. 6а и 6б). Завышение расчетных значений радиуса пленки объясняется наличием неравномерности подачи жидкости, что приводит к пульсациям и немного снижает радиус пленки.

Угол между волнами разрушения 2ψ в окрестности точки разрезания определяется локальными условиями течения [Рожков 1984, Ентов 1986]:

$$\sin \psi = 4(e\sigma/(\rho_L \varepsilon))^{0.5}/(U_{om} d_{om}), \quad (3)$$

где d_{om} – диаметр отверстий в разбрызгивающем устройстве.

С другой стороны этот угол можно получить аналитически, предположив, что разрыв образуется на первом пересечении волн (линия 0'1 на рис. 5). Анализируя уравнения пересечения окружностей можно получить:

$$\lambda(e + \lambda)/(e(y_1 - y_2)) = ((U_{om} d_{om})^2 \rho_L \varepsilon / (16e\sigma) - 1)^{0.5}. \quad (4)$$

$$\text{где } y_1 = \sqrt{(2R_l - e - \lambda)^2 - 4\left(\frac{R_l^2}{2e} - \frac{(2R_l - e - \lambda)^2}{8e} - \frac{e}{2}\right)^2};$$

$$y_2 = \sqrt{(2R_l - 3\lambda - e)^2 - 4\left(\frac{(R_l - \lambda)^2}{2e} - \frac{(2R_l - 3\lambda - e)^2}{8e} - \frac{e}{2}\right)^2}; \quad e - \text{расстояние между}$$

центрами 0 и 0', λ – длина волн.

Диаметр i -ой капли можно рассчитать по формуле:

$$a_i = (3S_i d_{om}^2 / (2\pi(2R_l - \lambda)))^{1/3}. \quad (5)$$

Площадь части пленки, из которой формируется i -ая капля можно определить:

$$S_i = 0,5 \int_{\beta_i}^{\beta_{i+1}} R_l^2 d\alpha + 0,5 \int_{\beta_i}^{\beta_{i+1}} (e \cos \alpha + ((R_l - e + (i+1)\lambda)^2 - e^2 \sin^2 \alpha)^{0.5})^2 d\alpha - \\ - 0,5 \int_{\beta_i}^{\beta_{i+1}} (R_l - \lambda)^2 d\alpha - 0,5 \int_{\beta_i}^{\beta_{i+1}} (e \cos \alpha + ((R_l - e + i\lambda)^2 - e^2 \sin^2 \alpha)^{0.5})^2 d\alpha. \quad (6)$$

Величину среднего объемного диаметра капель, с учетом условия $4e \gg \lambda$ и постоянства скорости по радиусу пленки, можно определить:

$$a_{30} = \sqrt[3]{\frac{3\lambda^2 d_{om}^2}{4e} \left(1 - \frac{\psi}{\pi}\right)}. \quad (7)$$

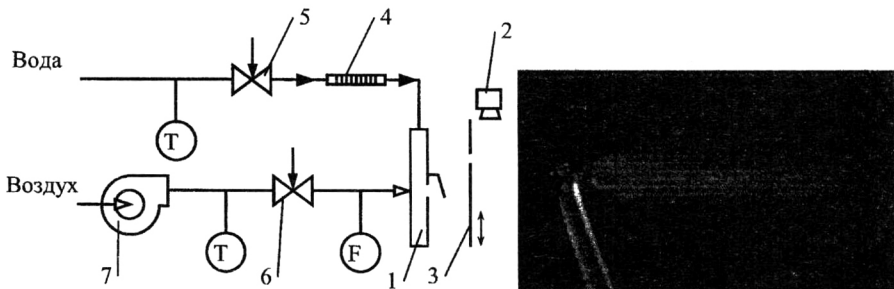


Рис. 7. Схема экспериментальной установки по определению дисперсного состава капель жидкости и фотография распыла: 1 – разбрызгивающее устройство; 2 – фотоаппарат; 3 – экран с узкой щелью; 4 – ротаметр; 5, 6 – вентили; 7 – вентилятор высокого давления

Для проверки адекватности математического описания определения дисперсного состава распыленной форсункой жидкости была создана экспериментальная установка (рис. 7). Исследования проводились на системе воздух-вода. Скорость жидкости составляла от 1 до 5 м/с, скорость газа составляла от 8 до 30 м/с. Фотографии делались фотоаппаратом Canon Power Shot SX100 IS со следующими характеристиками: эффективное количество пикселей – 8 млн., выдержка затвора – 4/10000 с. Разрешающая способность

объектива позволяла получать изображения капель с диаметром более 50 мкм. Для точного определения масштаба, полученных на фотопленке изображений капель, в фокальной плоскости объектива помещалась калиброванная нить.

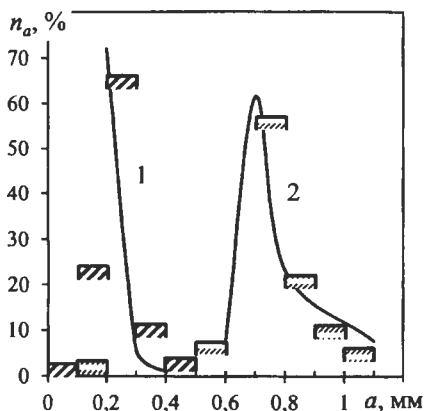


Рис. 8. Распределение капель по размерам при добавлении ПАВ.
 $d_{om} = 2$ мм; $e = 5$ мм; а) $U_{om} = 2,4$ м/с;
 σ , Н/м: 1 - $73 \cdot 10^{-3}$; 2 - $50 \cdot 10^{-3}$;
 3 - $30 \cdot 10^{-3}$

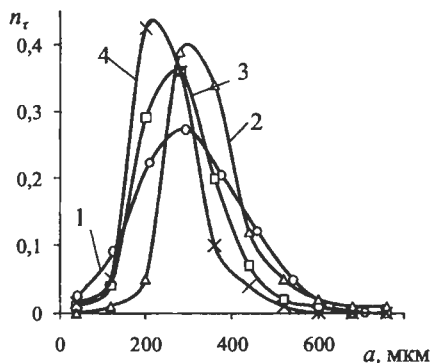


Рис. 9. Распределение капель по размерам:
 1 - без использования форсунки:
 $U_L = 2$ м/с; $W_{ex} = 20$ м/с; 2, 3, 4 - с
 использованием форсунки: $U_L = 2$ м/с;
 W_{ex} , м/с: 2 - 30; 3 - 20; 4 - 10

Результаты измерения дисперсного состава распыленной жидкости представлены на рис. 8 и 9. Погрешность математического описания составила менее 10%. Сопоставление частотных кривых показало, что при увеличении, как скорости газа, так и скорости истечения жидкости максимум кривой распределения смещается в сторону меньших диаметров капель, т. е. существует тенденция снижения диаметров капель. Однако это смещение весьма мало так, что в практических инженерных расчетах функцию плотности распределения капель по размерам можно считать не зависящей от скоростей газа и истекающей жидкости.

Формула (7) завышает значение среднего диаметра на 10-30% в зависимости от общего количества капель и для ее уточнения необходимо исключить из расчета самые крупные капли (первую, последнюю и предпоследнюю), т.к. при любом количестве образующихся капель их только 5:

$$a_{30} = \sqrt[3]{\frac{3}{4} \frac{\lambda^2 d_{om}^2}{e} \left(1 - \frac{2}{\pi} \arcsin \left(\frac{4}{U_{om} d_{om}} \sqrt{\frac{e \sigma}{\rho_L \epsilon}} \right) \right)} \quad (8)$$

Результаты численного исследования показали, что с увеличением расстояния e увеличивается скорость жидкости в отверстиях для создания волн минимальной длины, причем добавление ПАВ существенно снижает ее значение. При больших скоростях истечения жидкости необходимо увеличивать расстояния e , в противном случае длина волн возрастает, что приводит к образованию крупных капель. Не следует создавать пленки большого радиуса, так как капли собираются с большей длины окружности, что ведет к образованию крупных капель в широком диапазоне размеров (рис. 10).

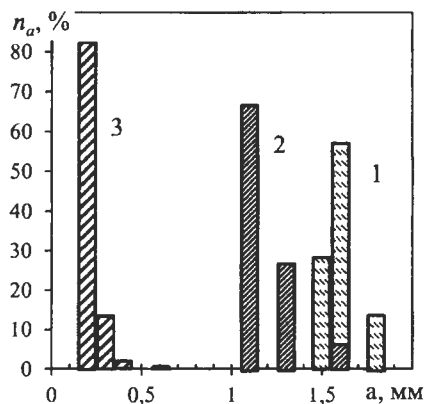


Рис. 10. Распределение капель по размерам при различных значениях e , $U_{om} = 2,7$ м/с; $\sigma = 73 \cdot 10^{-3}$ Н/м; e , мм: 1 - 5; 2 - 10

В четвертой главе рассмотрена гидродинамика в вихревых аппаратах.

На основе анализа сил, действующих на каплю в закрученном потоке газа, можно сделать вывод о том, что существенное влияние на движение капель оказывает сила аэродинамического сопротивления и сила тяжести.

Расчет траекторий и скоростей движения капель проводился для системы воздух-вода при температуре 20°C . Среднерасходная скорость газа в рабочей зоне аппарата составляла 15 м/с, скорость газа на входе в аппарат 15 м/с; радиус аппарата 0,4 м. Угол $\theta \approx 45^\circ$, угол вылета капель с диска форсунки φ варьировался в диапазоне от 0 до 360° .

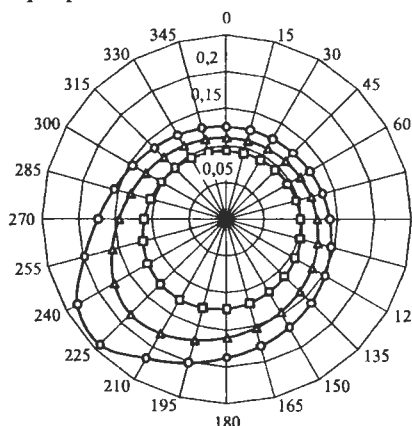


Рис. 11. Зависимость времени полёта капли от угла вылета капель с диска форсунки; $U_n = 1$ м/с; a , мкм: \square - 200; \triangle - 350; \circ - 490.

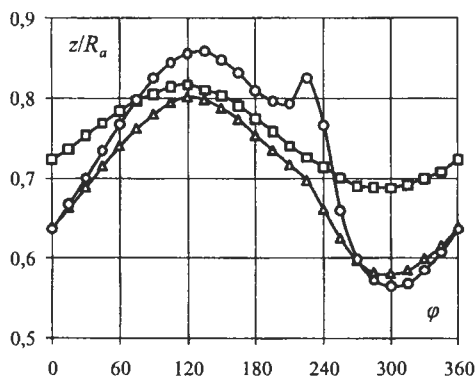


Рис. 12. Зависимость смещения капли по оси аппарата от угла отрыва от форсунки; $U_n = 1$ м/с; a , мкм: \square - 200; \triangle - 350; \circ - 490.

Время контакта капель жидкости с газом увеличивается с ростом диаметра капель (рис. 11), причем наибольшее время контактируют капли, вылетающие

под углом $\varphi \approx 225^\circ$. При достаточно больших скоростях вылета капель, при $\varphi = 210^\circ\text{--}225^\circ$, с дисков форсунок происходит их столкновение с центральной трубой и дополнительное дробление при ударе на более мелкие капли. Начальная скорость влияет на время контакта лишь для капель диаметром более 300 мкм. Капли всех образующихся диаметров достигают стенок аппарата при различных технологических параметрах его эксплуатации (рис. 12), так как смещение не превышает значения радиуса аппарата, следовательно, аппарат будет эффективно работать в широком диапазоне нагрузок по газу и жидкости. Время нахождения капель жидкости в рабочей зоне, при создании оптимальных условий может быть увеличено более чем в 2 раза, что важно при хемосорбционных процессах с медленными реакциями. Пневмогидравлические форсунки снижают унос жидкости на 10-15%, благодаря пониженному образованию микрокапель.

В пятой главе рассмотрена физическая сорбция в аппаратах вихревого типа. Математическое описание, позволяющее рассчитать изменение концентрации поглощаемого компонента в газовой и жидкой фазах по высоте аппарата предложено в работе Николаева А.Н. Данные экспериментов по водной абсорбции диоксида серы, полученных на описанной установке, представлены на рис. 13. Результаты расчета технологической эффективности по газовой фазе удовлетворительно согласуются с опытными данными.

Расчеты показали, что для эффективной очистки газовых выбросов от диоксида серы методом физической сорбции необходимо использовать большое количество аппаратов.

Расчеты полых вихревых аппаратов с ПВР проводились для аппарата с радиусом рабочей зоны $R_a = 0,3$ м, $R_p = 0,04$ м, $H_a = 1$ м; скорости газа на входе в аппарат $W_{ax} = 15$ м/с. Для создания третьего (рабочего) режима ПВР необходимо, чтобы число оборотов ПВР превышало 3000 об/мин.

Результаты расчетов показывают, что массообменная эффективность аппарата с монодисперсным распылом капель жидкости увеличивается по сравнению с аппаратом с полидисперсным распылом при создании капель диаметром менее 150 мкм. Направление вращения ПВР существенно влияет на эффективность лишь в случае создания капель диаметром более 100 мкм.

Для увеличения эффективности процесса массообмена, необходима высокая относительная скорость газа и капли, так как она существенно влияет на коэффициент массопереноса в газовой фазе. Скорость

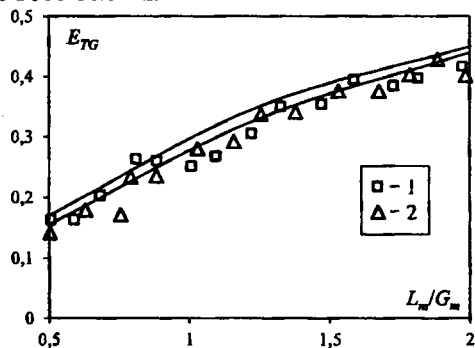


Рис. 13. Зависимость эффективности по газу от величины L_m/G_m при абсорбции диоксида серы водой. Сплошная линия — расчетные данные, точки — эксперимент. W_{ax} , м/с: 1 — 15; 2 — 40

можно увеличить, повысив число оборотов ПВР или увеличив скорость газа на входе в аппарат. Сравнение прямого и обратного вращения показывает, что направление вращения практически не влияет на относительную скорость капель, так как траектории капель, образованных в ПВР, практически полностью определяет поток газа.

При расчете аппарата рассматриваемой конструкции необходимо задавать определенные числа оборотов и скорость газа на входе в аппарат. При небольшой скорости газа, вследствие низкой закрутки газового потока, увеличивается осевое смещение капель. Осевое смещение капель незначительно в широком диапазоне изменений условий эксплуатации аппаратов. Таким образом, унос капель и высота аппарата будут минимальными, что важно для аппаратов, изготовляемых из дорогостоящих материалов.

В шестой главе представлена методика расчета вихревых аппаратов при химической сорбции. Рассмотрены основные стадии и механизмы массопереноса при абсорбции, сопровождаемой химической реакцией. Проведен анализ корреляций для расчета коэффициента ускорения хемосорбции. Рассчитаны коэффициенты массопередачи в широком диапазоне нагрузок по газовой и жидкой фазам.

При построении математического описания в контактной зоне вихревого аппарата был выделен элемент объема с высотой $d\zeta$, с поперечным сечением, равным поперечному сечению рабочей зоны аппарата. Количество жидкости, поступающей в выделенный элемент:

$$dL_V = L_V l(\zeta) d\zeta \quad (9)$$

где $\zeta = z/H_a$ – безразмерная проекция на ось аппарата; $l(\zeta)$ – функции распределения вытекающей из оросителя жидкости.

Материальный баланс для выделенного элемента:

$$-dy/d\zeta = dM_d/(G_V d\zeta) + dM_f/(G_V d\zeta) \quad (10)$$

Поток вещества, через поверхность капель в выделенном элементе

$$dM_d = L_V l(\zeta) (x_d + x_{B0}) d\zeta \quad (11)$$

После преобразования

$$dM_d/(G_V d\zeta) = (\rho_G/\rho_L) (L_m/G_m) l(\zeta) (x_d + x_{B0}) \quad (12)$$

Концентрация поглощаемого компонента в каплях:

$$dx_d/d\tau = - (6/a) K_{La} (y/m - x_d) \text{ при } x_d > 0, \quad (13)$$

$$dx_d/d\tau = - 6/(a m) K_{La} y \text{ при } x_d < 0. \quad (14)$$

Материальный баланс для выделенного элемента пленки

$$L_{VF} x_f + dM_f + x_d dL_V = (L_{VF} + dL_V) (x_f + dx_f), \quad (15)$$

где $L_{VF} = \int_0^\zeta l(\zeta) d\zeta$ – расход жидкости в пленке.

Средняя концентрация поглощаемого компонента в каплях, влетающих в пленку в выделенном элементе:

$$\bar{x}_d = \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} (L_{VF} + dL_V) (x_f + dx_f). \quad (16)$$

Количество компонента, поглощаемого элементом пленки жидкости, представлено функцией, зависящей от концентрации поглощаемого компонента в газовой и жидкой фазах $D = dM_f/(G_V d\zeta)$:

$$D = N_{GF} (y - m x_f), \text{ при } x_f > 0, \quad (17)$$

$$D = N_{Gf} y, \text{ при } x_f < 0, \quad (18)$$

где $N_{Gf} = K_{Gf} F/G_V$ – число единиц переноса для пленки.

Уравнения для расчета концентраций абсорбтива в газовой и жидкой фазах:

$$-dy/d\xi = (m/y) l(\xi) \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} (x_d + x_{B0}) n_v(a) da + D \int_0^{\xi} l(\xi) d\xi dx_f/d\xi = (\lambda/m D) + l(\xi) \left(\int_{a_{\min}}^{a_{\max}} (x_d + x_{B0}) n_v(a) da - x_f \right) \quad (19)$$

где $\lambda = m G_m \rho_L / (L_m \rho_G)$ – фактор массопередачи; m – константа фазового равновесия; $n_v(a)$ – функция распределения капель по размерам.

Уравнения (19) решаются со следующими граничными условиями

$$\xi = 0, y = y_0, x_f = \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} (x_d + x_{B0}) n_v(a) da. \quad (20)$$

Коэффициент массоотдачи для капель в газовой фазе рассчитывался из уравнения Хьюгмарт:

$$Sh_G = 1/2 [1,02 Re_G^{0.5} Sc_G^{0.33} + (2 + 0,035 Re_G^{0.8} Sc_G^{0.42})] \quad (21)$$

Коэффициент массоотдачи для капель в жидкой фазе рассчитывался по модифицированному уравнению Хигби (CO_2 -MDEA $R_A > 3$):

$$\beta_{La} = 4(1 + M_A \Xi / (1 + (1 + 4(M_A/R_A \Xi)^2)^{0.5} (D_A/\pi \tau)^{0.5}). \quad (22)$$

где $R_A = (2/(1 + \alpha) D_A/\beta_L r_n x_{Ap}^{\alpha-1} x_B^\beta)^{0.5}$ – кинетический параметр; $M_A = x_B/(n_A x_{Ap})$ – концентрационный параметр; $\Xi = (D_B/D_A)^{0.5}$.

Константа скорости прямой реакции для системы CO_2 -MDEA определяется:

$$r_{CO_2-MDEA} = k_{2,MDEA} [CO_2] [MDEA]. \quad (23)$$

Константу скорости прямой реакции для системы CO_2 -MDEA-MEA можно определить:

$$r_{CO_2-MEA-MDEA} = [CO_2] [MEA] / \{ 1/k_{2,MDEA} + k_{-1}/(k_{2,MEA} k_{2,H_2O} [H_2O] + k_{2,MEA} k_{2,OH} [OH] + k_{2,MEA} k_{MEA} [MEA] + k_{2,MEA} k_{MDEA} [MDEA]) \} \quad (24)$$

где $k_{MEA} = 9,56 \cdot 10^8 \exp(-3802,4/T)$; $k_{OH} = 5,04 \cdot 10^{12} \exp(-5411/T)$;

$k_{MDEA} = 2,58 \cdot 10^8 \exp(-3736,5/T)$.

Коэффициент массоотдачи для пленки в газовой фазе рассчитывался по аналогии Кольборна

$$\beta_G = \tau_\Sigma / (\rho_G W Sc_G^{0,66}) \quad (25)$$

где $\tau_\Sigma = \tau_f + \tau_a$ – суммарное касательное напряжение на границе раздела фаз; $\tau_f = C_{\rho L} (W_G - u_f)^2/8$ – касательное напряжение на гладкой поверхности; $\tau_a = E_a \rho_L U \sin \alpha (U \cos \alpha - u_f)$ – касательное напряжение на поверхности, возмущенной каплями.

Коэффициент массоотдачи для пленки в жидкой фазе рассчитывался по формуле Николаева

$$\beta_{Lf} = A \gamma_m [1 - \exp(-R_A / \text{th}(R_A) / (\gamma_m - 1, 2/\gamma_m))] \quad (26)$$

где $\gamma_m = 1 + x_B/(2 x_{Ap}) (D_B/D_A)^{0.5}$ – предельное значение коэффициента ускорения хемосорбции, A – множитель зависящий от W_{np} и q_{np} , W_{np} и q_{np} – приведенные скорость и плотность орошения.

Экспериментальные исследования, с целью проверки адекватности разработанного математического описания, и численные решения системы уравнения (19) с граничными условиями (20) проводились на системах диоксид серы - водный раствор извести и диоксид углерода - водный раствор MDEA. В

результате определялись значения относительной концентрации $Y' = 1 - y/y_0$ поглощаемого компонента в газовой фазе по высоте аппарата и эффективности. Концентрация SO_2 в газовой фазе на входе в аппарат y_0 была принята равной $5 \cdot 10^{-5}$ кмоль/м³. Концентрация диоксида серы в жидкости x_0 , поступающей на орошение аппарата, в расчетах равна нулю. Результаты показали удовлетворительную сходимость значений полученных в результате решения по разработанному математическому описанию с экспериментальными.

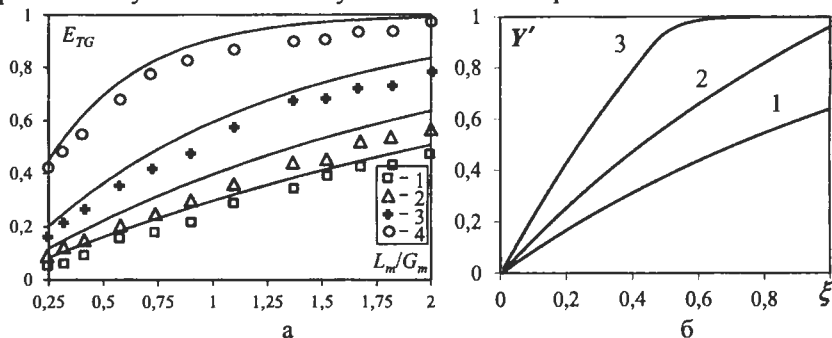


Рис. 14. Изменение технологической эффективности (а) и относительной концентрации поглощаемого компонента (б) в газовой фазе. Система водный раствор известки – диоксид серы. $D_{an} = 0,3$ м; $H_a = 0,8$ м; а) $y_0 = 5 \cdot 10^{-5}$ кмоль/м³; x_{B0} , кмоль/м³: 1 – 0; 2 – 0,01; 3 – 0,02; 4 – 0,04; б) $L_m/G_m = 1$; y_0 , 10^{-4} кмоль/м³: 1 – 1; 2 – 0,5; 3 – 0,25

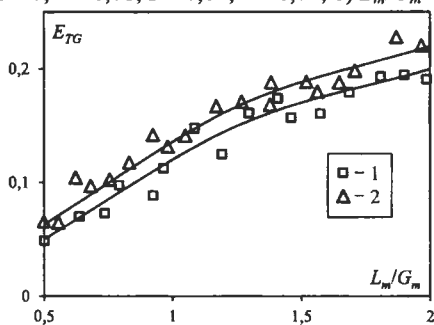


Рис. 15. Зависимость технологической эффективности процесса хемосорбционной очистки в ПВКУ от соотношения удельных массовых нагрузок L_m/G_m , кг/кг при температуре процесса t , °C: 1 – 50; 2 – 20

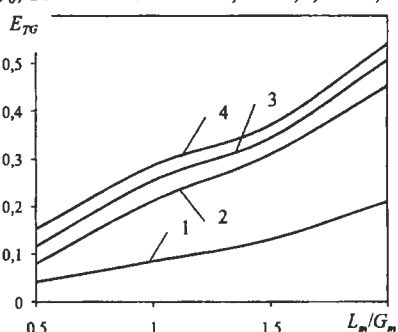


Рис. 16. Зависимость технологической эффективности процесса хемосорбционной очистки в ПВКУ от соотношения удельных массовых нагрузок L_m/G_m , кг/кг при давлении процесса P , МПа: 1 – 0,1; 2 – 1; 3 – 2; 4 – 3

В результате исследования процесса хемосорбции было выявлено, что с увеличением отношения массовых расходов жидкой и газовой фаз увеличивается как эффективность аппарата, так и средняя движущая сила (рис. 14а, 14б). Увеличение эффективности поглощения диоксида серы при протекании химической реакции по сравнению с физической сорбцией объясняется тем, что в аппарате вихревого типа исключается процесс десорбции

из пристенной пленки жидкости. Поглощение пленкой жидкости происходит при большой движущей силе массообмена (относительное значение которой может достигать единицы), а коэффициенты массоотдачи в пленке, обусловленные большой степенью перемешивания жидкости, более чем на порядок превышают коэффициенты массоотдачи в каплях жидкости, массоперенос в которых определяется в основном молекулярной диффузией.

Результаты расчетов ПВКУ и сравнение их с экспериментальными данными представлены на рис. 15. Погрешность расчета эффективности очистки водородсодержащих газов от CO_2 водным раствором $MDEA$ составила 14%. Расчеты показали, что эффективная очистка возможна лишь при повышенном давлении и при создании многоступенчатого процесса (рис. 16). Кроме того, процесса с идеальным вытеснением по жидкости позволяет увеличить эффективность очистки CO_2 водным раствором $MDEA$, при определенных условиях, на 20%.

В седьмой главе рассмотрена пылеочистка в аппаратах вихревого типа.

Исследования показали, что доминирующими механизмами осаждения взвешенных частиц в полых вихревых аппаратах на капли и пленку являются инерционный механизм и турбулентная миграция.

Для составления математического описания осаждения частиц на капли за счет инерционного механизма в зоне перекрестного взаимодействия фаз был выделен элементарный объем (тор) высотой dz . Пренебрегая изменением осевой составляющей скорости газа по длине аппарата, радиальным смещением частиц и их проскальзыванием относительно потока газа в тангенциальном и осевом направлениях, можно записать материальный баланс для частиц в выделенном элементе:

$$dM = 3 dr (dz/2) L_v H \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} U_o/U_r (\eta_{Stk} n_a/a) da. \quad (27)$$

Изменение количества дисперсной фазы в газовом потоке обусловлено захватом частиц каплями жидкости и определяется эффективностью захвата частиц одиночной каплей η_{Stk} .

Уравнение, характеризующее эффективность улавливания частиц каплями жидкости за счет инерционного осаждения:

$$\eta'_{Sj} = 1 - \exp(3/4 L_v/(\pi r \Delta H W_2) dz \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} U_o/U_r (\eta_{Stk} n_a/a) da) \quad (28)$$

Эффективность осаждения частиц за счет турбулентной миграции на капли жидкости, на высоте dz , определится:

$$\eta'_t = dV_p/dV \quad (29)$$

где dV_p – объём газа в выделенном элементарном объеме, где происходит оседание частиц; $dV = \pi(R_a^2 - R_{op}^2)dz$ – объём газа в выделенном элементарном объеме.

За время полета капли на нее осадут частицы, находящиеся в объеме:

$$V_{p1} = 2\pi/3 \int_0^\theta r^3 \sin\varphi d\varphi - \pi_{x1} \int_{x1}^{x2} (a^2/4 - x^2) dx \quad (30)$$

где $r = a[1/2 + U_p/U_o(\pi - \theta - \varphi)]$ – максимальное расстояние от центра капли до осаждаемой частицы, м; θ – угол отрыва вихрей за каплей, при числе Рейнольдса обтекания капли $Re_a < 10$, $\theta = 0$; при $Re_a < 200$, $\theta = 17\pi/72(\ln(Re_a/10))^{0.483}$; при

$Re_a < 1,5 \cdot 10^5$, $\theta = \pi (17/30 - 71/60 Re_a^{-0,37})$ [Кутепов 1996]; $x_1 = a/2 \cos \theta$; $x_2 = a/2$.

В выделенном объеме на капли осядут частицы находящиеся в объеме:

$$dV_p = V_{p1} dn_a \quad (31)$$

Количество капель в выделенном объеме определится:

$$dn_a = 6\tau_d/(\pi a^3) L_v/H dz. \quad (32)$$

Выражение (29) с учетом выражений (30)-(32) запишется:

$$\eta'_i = V_{p1} L_v/(H \pi (R_a^2 - R_p^2)) 6\tau_d/(\pi a^3) \quad (33)$$

Эффективность осаждения частиц на капли за счет механизма турбулентной миграции:

$$\eta'_{ij} = 6V_{p1}/(\pi a^3) (\tau_d/\tau_{cp})(L_m/G_m)(\rho_G/\rho_L) dz/H \quad (34)$$

где $\tau_{cp} = H\pi(R_a - R_p)/G_v$ – среднее время пребывания газа в рабочей зоне аппарата.

Эффективность осаждения частиц за счет турбулентной миграции на стекающую пленку жидкости можно определить по зависимости:

$$\eta'_{if} = 1 - \exp(-dz/(R_a - R_p)U/W_{cp}) \quad (35)$$

Скорость турбулентной миграции определялась по уравнению Медникова:

$$U_i^+ = A(\tau^+)^2/(1 + \omega_E \tau^+)^2 \quad (36)$$

Суммарная эффективность:

$$\eta'_\Sigma = 1 - (1 - \eta'_{sj})(1 - \eta'_{ij})(1 - \eta'_{if}). \quad (37)$$

Экспериментальные исследования и расчеты проводились на примере аппарата с радиусом рабочей зоны $R_a = 0,3$ м, высотой рабочей зоны $H = 0,8$ м, плотность частиц полимеров $\rho_p = 1050$ кг/м³. Экспериментальные и расчетные данные показывают высокую эффективность осаждения частиц в аппарате с интенсивным взаимодействием фаз, что подтверждается теоретическими расчетами (рис. 17 и 18).

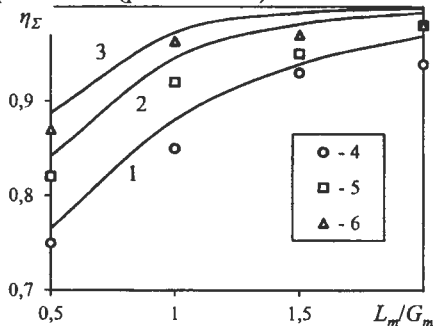


Рис. 17. Проверка адекватности математического описания процесс пылеочистки в вихревом аппарате с форсунками пневмогидравлического действия; W_{cp} , м/с: 1 – 4; 2 – 5; 3 – 6; 4 – 10; сплошная линия – расчет, точки – эксперимент

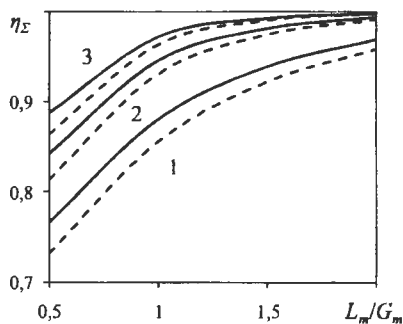


Рис. 18. Зависимость суммарной эффективности пылеулавливания от отношения массовых расходов жидкой и газовой фаз; W_{cp} , м/с: 1 – 20; 2 – 15; 3 – 10; сплошная линия – с использованием форсунки, штриховая – без использования форсунки

Частицы, размер которых не превышает 3 мкм, будут улавливаться за счет механизма турбулентной миграции. Турбулентная миграция на капли

существенно ниже миграции на пленку, так как время осаждения на капли при интенсивном взаимодействии фаз очень маленькое.

При использовании форсунки ударного пневмогидравлического действия наблюдается повышение общей эффективности улавливания твёрдых частиц (рис. 18). Это объясняется следующими причинами: уменьшение среднего диаметра капель жидкости, а, следовательно, повышение их удельной поверхности; отсутствие нерабочей зоны в аппарате; широкий факел распыла, что способствует равномерному распределению жидкости по объёму аппарата.

В восьмой главе рассмотрены технологические схемы процессов очистки газовых выбросов с использованием аппаратов вихревого типа.

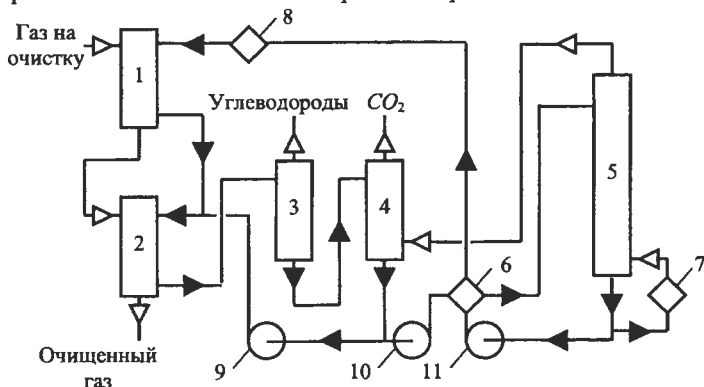


Рис. 19. Схема двухступенчатой очистки от CO_2 водным раствором *MDEA*: 1 – абсорбер грубой очистки, 2 – абсорбер тонкой очистки, 3, 4, 5 – десорберы, 6 – теплообменник, 7 – испаритель, 8 – холодильник, 9, 10, 11 – насосы.

На рис. 19 представлена схема двухступенчатого процесса, в котором большинство CO_2 улавливается в абсорбере 1 при использовании частично регенерируемого раствора *MDEA*, а для тонкой очистки используется полностью восстановленный раствор *MDEA* в абсорбере 2. Насыщенный раствор амина сначала регенерируется в колонне 3, работающей под высоким давлением, где десорбируются углеводороды, затем частично регенерируется в колонне пониженного давления 4. Для повышения эффективности горячий газ из десорбера 5 подается в десорбер 4. Часть раствора из десорбера 4 подается в десорбер 5, другая часть в абсорбер 2.

Метод двухступенчатой очистки от диоксида углерода водным раствором *MDEA* позволяет полностью использовать раствор *MDEA* с минимальными его потерями и сниженными энергетическими затратами на проведение процесса.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Представлен анализ аппаратов для очистки газовых выбросов от химически и экологически опасных компонентов; отмечается, что наиболее перспективным типом аппаратов для реализации эффективной очистки крупнотоннажных газовых выбросов являются вихревые аппараты.

2. Разработаны и защищены патентами Российской Федерации на полезные модели конструкции прямоточно-вихревых контактных устройств и аппаратов

для очистки газовых выбросов от химически и экологически опасных компонентов. Предложенные конструкции приняты к внедрению на ОАО «Нижнекамскнефтехим» г. Нижнекамск, ООО «СафПласт» г. Казань, ЗАО «Полимализ» г. Елабуга, ООО «ПромКомплект» г. Нижнекамск, ООО «Татнефть-Пресскомпозит» г. Елабуга.

3. Исследован дисперсный состав жидкости, распыленной ударным пневмогидравлическим распылителем при различных нагрузках по жидкости и газу; получены зависимости, связывающие геометрические размеры распылителей с технологическими параметрами, позволяющие проектировать аппараты максимальной эффективности.

4. Выполнен комплекс теоретических исследований динамики двухфазного газожидкостного потока в вихревых аппаратах с различными разбрызгивающими устройствами на основе закономерностей газодинамических характеристик и экспериментальных исследований дисперсной структуры жидкости, а также физических свойств, взаимодействующих сред. Выявлено, что диапазон работы вихревых аппаратов можно существенно расширить, установив лопасти для поддержания вихревой структуры по их высоте.

5. В результате экспериментальных и численных исследований получены зависимости скорости жидкости в сепарационных отверстиях ПВКУ от скорости несущего газового потока, величины удельной нагрузки по фазам и конструктивного исполнения отверстий. Показано, что надежная сепарация в ПВКУ обеспечивается во всем диапазоне изменения нагрузок.

6. Разработано математическое описание процесса очистки газовых выбросов от диоксида углерода и диоксида серы путем физической и химической сорбции в разработанных аппаратах вихревого типа. Показано, что эффективность разработанных вихревых аппаратов при очистке газовых выбросов от этих компонентов может достигать значения 98%.

7. Установлена адекватность предложенного математического описания процессу химической сорбции в аппаратах вихревого типа. Отклонение составляет не более 15%.

8. Разработана инженерная методика проектирования и расчета вихревых аппаратов, обеспечивающая заданную степень очистки промышленных газов от химически и экологически опасных компонентов.

9. Получены зависимости эффективности массообмена в аппаратах с прямоточно-вихревыми контактными устройствами с односторонней сепарацией, показано, что использование предложенных контактных устройств позволяет повысить эффективность работы ступени на 20% по сравнению с использованием ПВКУ других конструкций.

10. Произведено сравнение влияния различных механизмов осаждения частиц на общую эффективность очистки газа в полых вихревых аппаратах. Показано, что основной вклад в улавливание твердых частиц вносят инерционный механизм осаждения на каплях и турбулентная миграция дисперсных частиц к плёнке жидкости.

11. Представлен анализ методов очистки газовых выбросов от диоксида углерода; показана наибольшая экономическая целесообразность

двухступенчатой очистки газовых выбросов водным раствором *MDEA*.

Основные обозначения

W_ϕ , W_r , W_z , W_{cp} – тангенциальная, радиальная, осевая и среднерасходная скорости газа, м/с; U_{om} – скорость истечения жидкости из отверстий, м/с; U_ϕ , U_r , U_{cp} – тангенциальная, радиальная, средняя скорости капли (пленки), м/с; U_o – относительная скорость капли, м/с; a – диаметр капли, м; δ – толщина пленки жидкости, м; ρ_L , ρ_G – плотности жидкой и газовой фаз, кг/м³; P – давление, Па; G_m , L_m – массовые расходы газа и жидкости, кг/с; G_v , L_v – объемные расходы газа и жидкости, м³/с; c – концентрация дисперсной фазы в газе, кг/м³; x , y – концентрация компонента в жидкой и газовой фазе, кмоль/м³; τ – касательное напряжение на границе раздела фаз (время полета капли), Па (с); R_a , D_a – радиус и диаметр рабочей зоны аппарата, м; H – высота рабочей зоны, м; β_L , β_G – коэффициенты массоотдачи в жидкой и газовой фазах; Sh – число Шервуда; Pr – число Прандтля; Sc – число Шмидта; Re – число Рейнольдса; We – критерий Вебера; E_{TG} – технологическая эффективность в газовой фазе; σ – поверхностное натяжение, Н/м².

Индексы: 0 – начальное значение; r – проекция на радиус; z – проекция на ось аппарата; ϕ – тангенциальная составляющая; L – жидкая фаза; G – газовая фаза; a – капля; f – пленка; m – массовый расход.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Монографии

1. Николаев А. Н. Очистка газовых выбросов ТЭС, работающих на твердом и жидком топливе / А. Н. Николаев, А. В. Дмитриев, Д. Н. Латыпов. – Казань : ЗАО «Новое знание», 2004. – 136 с.

2. Калимуллин И. Р. Производство и применение водорода / И. Р. Калимуллин, А. В. Дмитриев, Н. А. Николаев. – Казань : ЗАО «Новое знание», 2008. – 176 с.

Статьи в рецензируемых научных журналах и изданиях по перечню ВАК

3. Дмитриев А. В. Динамика сплошной фазы в аппаратах вихревого типа, предназначенных для комплексной очистки газовых выбросов промышленных предприятий / А. В. Дмитриев, Д. Н. Латыпов, А. Н. Николаев // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2004. – Т. 47. – № 10. – С. 85-88.

4. Дмитриев А. В. Очистка газовых выбросов ТЭС, работающих на серосодержащем топливе / А. В. Дмитриев, Д. Н. Латыпов, Н. А. Николаев // Промышленная энергетика. – 2005. – № 5. – С. 42-45.

5. Дмитриев А. В. Очистка газовых выбросов ТЭС в аппаратах вихревого типа / А. В. Дмитриев, А. Н. Николаев, Н. А. Николаев, Д. Н. Латыпов // Промышленная энергетика. – 2006. – № 3. – С. 46-49.

6. Ежов П. В. Очистка и дезодорация газовых выбросов пищевых предприятий / П. В. Ежов, А. В. Дмитриев, Н. А. Николаев // Пищевая промышленность. – 2007. – № 7. – С. 48-49.

7. Овчинников А. А. Закономерности движения капель жидкости в вихревой камере / А. А. Овчинников, А. В. Дмитриев, П. В. Ежов, А. Н. Николаев // Химическая промышленность сегодня. – 2007. – № 1. – С. 26-28.

8. Ежов П. В. Очистка промышленных газовых выбросов от паров легколетучих органических растворителей / П. В. Ежов, А. В. Дмитриев, Н. А. Николаев //

Экология и промышленность России. – 2007. – № 10. – С. 8-9.

9. Дмитриев А. В. Взаимодействия при касании препятствия взвешенной в потоке частиц / А. В. Дмитриев, М. Г. Зиганшин // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2008. – № 3-4. – С. 58-63.

10. Зиганшин М. Г. Эффективность очистки газовых выбросов парогенераторов ТЭС в аппаратах вихревого типа / М. Г. Зиганшин, П. В. Ежов, А. В. Дмитриев // Промышленная энергетика. – 2008. – № 9. – С. 49-53.

11. Дмитриев А. В. Сравнительные характеристики эффективности конструкций сепараторов дисперсных потоков / А. В. Дмитриев, М. Г. Зиганшин // Известия КазГАСУ. – 2008. – № 2 (10). – С. 96-100.

12. Калимуллин И. Р. Экологические аспекты производства водорода / И. Р. Калимуллин, А. В. Дмитриев, Н. А. Николаев // Экология и промышленность России. – 2009. – Март. – С. 38-39.

13. Зиганшин М. Г. Расчет эффективности сепарации потоков эмульсий в аппаратах / М. Г. Зиганшин, А. В. Дмитриев // Промышленная энергетика. – 2009. – № 3. – С. 51-56.

14. Дмитриев А. В. Очистка газовых выбросов ТЭС от диоксида углерода в вихревых аппаратах с пористыми вращающимися распылителями / А. В. Дмитриев, Г. Х. Гумерова, Н. А. Николаев // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2009. – № 1-2. – С. 34-39.

15. Калимуллин И. Р. Применение аппаратов с интенсивными гидродинамическими режимами для снижения выбросов двуоксида углерода / И. Р. Калимуллин, Д. Д. Латыпов, А. В. Дмитриев // Вестник Казанского технологического университета. – 2009. – № 3. – С. 15-19.

16. Коньков О. А. Использование аппаратов с интенсивными гидродинамическими режимами в системах очистки крупнотоннажных газовых выбросов химических предприятий / О. А. Коньков, А. В. Дмитриев // Вестник Казанского технологического университета. – 2009. – № 3. – С. 25-29.

17. Зиганшин М. Г. Аппараты и режимы комплексной обработки выбросов с галогенсодержащими загрязнителями / М. Г. Зиганшин, А. М. Зиганшин, А. В. Дмитриев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. – № 4. – С. 34-37.

18. Гумерова Г. Х. Динамика дисперсной фазы в вихревом аппарате с пористыми вращающимися распылителями / Г. Х. Гумерова, А. В. Дмитриев, Н. А. Николаев // Химическая промышленность сегодня. – 2009. – № 5. – С. 47-50.

19. Дмитриев А. В. Повышение эффективности обработки галогенсодержащих производственных выбросов / А. В. Дмитриев, А. М. Зиганшин, М. Г. Зиганшин // Химическая промышленность сегодня. – 2009. – № 6. – С. 21-27.

20. Гумерова Г. Х. Очистка низконапорных газовых выбросов энергетических установок в аппаратах вихревого типа с пористыми вращающимися распылителями / Г. Х. Гумерова, А. В. Дмитриев, Н. А. Николаев // Промышленная энергетика. – 2009. – № 6. – С. 59-62.

21. Коньков О. А. Турбулентная миграция в вихревой камере / О. А. Коньков, П. В. Ежов, А. В. Дмитриев, Н. А. Николаев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. – № 6. – С. 15-18.

22. Калимуллин И. Р. Очистка водородосодержащих газов в аппаратах вихревого типа / И. Р. Калимуллин, А. В. Дмитриев, А. Н. Николаев // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2009. – № 8. – С. 195-198.
23. Макушева О. С. Вихревой мембранный аппарат для разделения водородосодержащих газов / О. С. Макушева, А. В. Дмитриев, Н. А. Николаев // *Альтернативная энергетика и экология*. – 2009. – № 8 (76). – С. 199-200.
24. Дмитриев А. В. Расчет профиля лопастей в вихревом массообменном аппарате с пористыми вращающимися распылителями / А. В. Дмитриев, Н. А. Николаев // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. – 2009. – № 10. – С. 3-5.
25. Калимуллин И. Р. Увеличение эффективности очистки газовых выбросов промышленных предприятий в аппаратах с прямоточно-вихревыми контактными устройствами / И. Р. Калимуллин, А. В. Дмитриев, А. Н. Николаев // *Экология и промышленность России*. – 2009. – Декабрь. – С. 11-13.
26. Зиганшин М. Г. Режимные параметры аппаратов с фонтанирующим слоем полидисперсного материала. Часть 1. Расчетные параметры потери устойчивости полидисперсной системы / М. Г. Зиганшин, А. М. Зиганшин, А. В. Дмитриев // *Известия КазГАСУ*. – 2009. – № 2 (12). – С. 179-183.
27. Зиганшин М. Г. Режимные параметры аппаратов с фонтанирующим слоем полидисперсного материала. Часть 2. Определение параметров фонтанирования полидисперсного материала / М. Г. Зиганшин, А. М. Зиганшин, А. В. Дмитриев // *Известия КазГАСУ*. – 2009. – № 2 (12). – С. 184-189.
28. Коньков О. А. Применение вихревых аппаратов для очистки газовых выбросов при производстве и переработке пластмасс / О. А. Коньков, А. В. Дмитриев, А. Н. Николаев // *Экология и промышленность России*. – 2010. – Январь. – С. 8-11.
29. Дмитриев А. В. Перспективы использования аппаратов прямоточно-вихревого типа для очистки крупнотоннажных газовых выбросов промышленных предприятий / А. В. Дмитриев, И. Р. Калимуллин, Н. А. Николаев // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. – 2010. – Т. 53. – № 3. – С. 125-127.
30. Макушева О. С. Вихревая камера для очистки газовых выбросов промышленных предприятий / О. С. Макушева, А. В. Дмитриев, Н. А. Николаев // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. – 2010. – № 6. – С. 12-13.
31. Дмитриев А. В. Оценка изменения уровня жидкости на ступени массообменного аппарата с прямоточно-вихревыми контактными устройствами / А. В. Дмитриев, И. Р. Калимуллин, Н. А. Николаев // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. – 2010. – № 8. – С. 11-13.
32. Дмитриев А. В. Очистка газовых выбросов в вихревых камерах с разбрызгивающим устройством / А. В. Дмитриев, О. С. Макушева, А. Н. Николаев // *Экология и промышленность России*. – 2010. – № 10. – С. 15-17.
33. Калимуллин И. Р. Прямоточно-вихревое контактное устройство для очистки водородсодержащих газов / И. Р. Калимуллин, М. А. Закиров, А. В. Дмитриев // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2010. – № 10. – С. 279-281.
34. Макушева О. С. Контактные устройства с увеличенной пропускной способностью для тепломассообменных процессов / О. С. Макушева,

- А. В. Дмитриев, А. Н. Николаев // Вестник Казанского технологического университета. – 2010. – № 10. – С. 648-649.
35. Калимуллин И. Р. Очистка водородосодержащих газов от диоксида углерода в аппаратах с прямоточно-вихревыми контактными устройствами / И. Р. Калимуллин, А. В. Дмитриев, А. Н. Николаев // Альтернативная энергетика и экология. – 2010. – № 1. – С. 110-113.
36. Калимуллин И. Р. Очистка крупнотоннажных газовых выбросов промышленных предприятий / И. Р. Калимуллин, А. В. Дмитриев, А. Н. Николаев // Экология и промышленность России. – 2011. – Февраль. – С. 4-6.
37. Дмитриев А. В. Распределение жидкой фазы в колонных массообменных аппаратах с регулярной насадкой / А. В. Дмитриев, К. В. Дмитриева, А. Н. Николаев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2011. – № 2. – С. 3-5.
38. Коньков О. А. Динамика дисперсной фазы в аппаратах вихревого типа с форсунками ударного пневмогидравлического действия / О. А. Коньков, А. В. Дмитриев, А. Н. Николаев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2011. – № 2. – С. 5-7.
39. Дмитриев А. В. Перспективы использования аппаратов вихревого типа с винтами для охлаждения и нагрева газов / А. В. Дмитриев, О. С. Макушева, А. Н. Николаев // Промышленная энергетика. – 2011. – № 2. – С. 41-43.
40. Гумерова Г. Х. Оптимизация размеров регулярной насадки для тепломассообменных процессов / Г. Х. Гумерова, О. С. Макушева, А. В. Дмитриев // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – Т. 14. – № 3. – С. 35-37.
41. Калимуллин И. Р. Перспективы использования абсорбентов на основе третичных аминов для повышения эффективности очистки газов в аппаратах высокой пропускной способности / И. Р. Калимуллин, А. В. Дмитриев // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – Т. 14. – № 3. – С. 143-145.
42. Макушева О. С. Контактные устройства для охлаждения оборотной воды промышленных предприятий / О. С. Макушева, А. В. Дмитриев, А. Н. Николаев // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – Т. 14. – № 3. – С. 153-154.
43. Калимуллин И. Р. Сепарация жидкости в прямоточно-вихревых контактных устройствах / И. Р. Калимуллин, А. В. Дмитриев, А. Н. Николаев // Химическая промышленность сегодня. – 2011. – № 5. – С. 38-42.
44. Макушева О. С. Использование разбрызгивающих устройств в вихревых камерах для охлаждения оборотной воды / О. С. Макушева, А. В. Дмитриев // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 8. – С. 337-340.
45. Макушева О. С. Оценка экономического эффекта от внедрения контактных устройств с увеличенной пропускной способностью / О. С. Макушева, А. В. Дмитриев // Вестник Казанского технологического университета. – 2011. – № 8. – С. 355-358.
46. Дмитриев А. В. Контактные массообменные устройства для увеличения производительности действующих колонных аппаратов / А. В. Дмитриев, О. С. Макушева, К. В. Дмитриева, А. Н. Николаев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2011. – № 5. – С. 19-21.

47. Коньков О. А. Диспергирование жидкости в полых вихревых аппаратах для очистки газовых выбросов / О. А. Коньков, О. С. Макушева, А. В. Дмитриев // *Экология и промышленность России*. – 2011. – Июль. – С. 14-16.
48. Коньков О. А. Очистка газовых выбросов ТЭС от твердых частиц в вихревых аппаратах с форсунками ударного пневмогидравлического действия / О. А. Коньков, А. В. Дмитриев, А. Н. Николаев // *Промышленная энергетика*. – 2011. – № 6. – С. 46-48.
49. Дмитриев А. В. Охлаждение оборотной воды промышленных установок в вихревых камерах / А. В. Дмитриев, О. С. Макушева, Н. А. Николаев // *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. – 2011. – № 7. – С. 19-22.

Патенты

50. Пат. 68480 Российская Федерация. Устройство рекуперации паров нефтепродуктов для резервуаров / Дмитриев А. В., Ежов П. В., Николаев Н. А.; опубл. 27.11.2007, Бюл. № 33. – 2 с.
51. Пат. 76576 Российская Федерация. Вихревое устройство с пористыми вращающимися распылителями / Гумерова Г. Х., Калимуллин И. Р., Дмитриев А. В., Николаев Н. А.; опубл. 27.09.2008, Бюл. № 27. – 2 с.
52. Пат. 77670 Российская Федерация. Вихревое устройство для охлаждения газа / Калимуллин И. Р., Дмитриев А. В., Николаев А. Н.; опубл. 27.10.2008, Бюл. № 30. – 2 с.
53. Пат. 78690 Российская Федерация. Вихревое устройство для выделения водорода / Калимуллин И. Р., Дмитриев А. В., Латыпов Д. Н.; опубл. 10.12.2008, Бюл. № 34. – 2 с.
54. Пат. 83713 Российская Федерация. Мембранное устройство для выделения водорода / Гумерова Г. Х., Калимуллин И. Р., Дмитриев А. В., Николаев Н. А.; опубл. 20.06.2009, Бюл. № 17. – 2 с.
55. Пат. 84254 Российская Федерация. Вихревое устройство с монодисперсным распылом жидкости / Дмитриев А. В., Дмитриева К. В., Николаев А. Н.; опубл. 10.07.2009, Бюл. № 19. – 2 с.
56. Пат. 87103 Российская Федерация. Регулярная насадка для пленочных теплообменников аппаратов / Дмитриев А. В., Макушева О. С., Николаев Н. А., Гарипов М. Г.; опубл. 27.09.2009, Бюл. № 27. – 2 с.
57. Пат. 87923 Российская Федерация. Прямоточно-вихревое устройство для контакта газа и жидкости / Калимуллин И. Р., Деев Е. Б., Николаев А. Н., Дмитриев А. В.; опубл. 27.10.2009, Бюл. № 30. – 2 с.
58. Пат. 87924 Российская Федерация. Вихревое устройство с двумя зонами контакта / Дмитриев А. В., Макушева О. С., Николаев Н. А.; опубл. 27.10.2009, Бюл. № 30. – 2 с.
59. Пат. 88283 Российская Федерация. Вихревой аппарат для очистки высокотемпературных газов / Дмитриев А. В., Коньков О. А., Николаев А. Н.; опубл. 10.11.2009, Бюл. № 31. – 2 с.
60. Пат. 89000 Российская Федерация. Разбрызгивающее устройство / Макушева О. С., Дмитриев А. В., Николаев Н. А.; опубл. 27.11.2009, Бюл. № 33. – 2 с.
61. Пат. 88999 Российская Федерация. Полый вихревой аппарат для улавливания частиц из газовых потоков / Хабирова Т. Г., Дмитриев А. В., Николаев Н. А.;

опубл. 27.11.2009, Бюл. № 33. – 2 с.

62. Пат. 89824 Российская Федерация. Трубчатый реактор с закрученными потоками / Дмитриев А. В., Коньков О. А., Николаев А. Н.; опубл. 20.12.2009, Бюл. № 35. – 2 с.

63. Пат. 96786 Российская Федерация. Контактное устройство для теплообменных процессов / Макушева О. С., Дмитриев А. В., Николаев А. Н.; опубл. 20.08.2010, Бюл. № 23. – 2 с.

64. Пат. 99339 Российская Федерация. Распределитель жидкости для теплообменных аппаратов / Макушева О. С., Дмитриев А. В., Николаев А. Н.; опубл. 20.11.2010, Бюл. № 32. – 2 с.

65. Пат. 101792 Российская Федерация. Контактное устройство с односторонней сепарацией для теплообменных аппаратов / Дмитриев А. В., Калимуллин И. Р., Николаев А. Н.; опубл. 27.01.2011, Бюл. № 3. – 2 с.

66. Пат. 102309 Российская Федерация. Разбрызгивающее устройство для аппаратов с интенсивным взаимодействием фаз / Коньков О. А., Макушева О. С., Дмитриев А. В., Николаев А. Н.; опубл. 27.02.2011, Бюл. № 6. – 2 с.

67. Пат. 102984 Российская Федерация. Вихревой холодильно-нагревательный аппарат / Макушева О. С., Дмитриев А. В., Николаев А. Н.; опубл. 20.03.2011, Бюл. № 8. – 2 с.

Международные конференции

68. Николаев А. Н. Математическое моделирование массообменных процессов в полых вихревых аппаратах / А. Н. Николаев, А. В. Дмитриев, Д. Н. Латыпов // 18-ая международная конференция «Математические методы в технике и технологиях»: Т. 3. – Казань, 2005. – С. 111-115.

69. Зиганшин М. Г. Комплексные показатели совершенства очистки воздуха и производственных выбросов при наличии “парниковых” газов / М. Г. Зиганшин, А. В. Дмитриев, А. И. Еремкин // Materiály IV mezinárodní vědecko – praktická conference “Věda a technologie: krok do budoucnosti - 2008”. – Praha, 2008. – S. 84-86.

70. Дмитриев А. В. Очистка газовых выбросов промышленных предприятий в полых вихревых аппаратах с пористыми вращающимися распылителями / А. В. Дмитриев, Г. Х. Гумерова, Н. А. Николаев // Наука, образование, производство в решении экологических проблем: сборник научных статей V-й Международной научно-технической конференции. – Уфа: УГАТУ, 2008. – С. 160-166.

71. Овчинников А. А. Динамика капель жидкости в вихревых камерах / А. А. Овчинников, П. В. Ежов, А. В. Дмитриев, А. Н. Николаев // Общероссийская конференция молодых ученых с международным участием «Пищевые технологии». – Казань, 2006. – С. 154-155.

72. Коньков О. А. Турбулентная миграция в полном вихревом аппарате / О. А. Коньков, А. В. Дмитриев, Н. А. Николаев // Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-22» (г. Псков, 25-30 мая 2009 г.): сборник трудов. – Псков: Псковский государственный политехнический институт, 2009. – С. 10-12.

73. Чернобровкина Л. С. Полые вихревые аппараты для теплообменных процессов пищевых производств / Л. С. Чернобровкина, О. А. Коньков, А. В. Дмитриев // X Международная конференция молодых ученых «Пищевые

технологии и биотехнологии» (12-15 мая 2009 г.). – Казань, 2009. – С. 170.

74. Дмитриев А. В. Расчет эффективности очистки водородосодержащих газов в аппаратах вихревого типа / А. В. Дмитриев, И. Р. Калимуллин, А. Н. Николаев // Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-23» (г. Саратов, 24-29 мая 2010 г.): сборник трудов. – Саратов : Саратовский государственный технологический университет, 2010. – С. 64-66.

75. Макушева О. С. Перспективы использования прямоточно-вихревых контактных устройств в массообменных аппаратах для очистки газовых выбросов / О. С. Макушева, А. В. Дмитриев, И. Р. Калимуллин // X Международная научно-практическая конференция «Экология и ресурсо- и энергосберегающие технологии на предприятиях народного хозяйства» (г. Пенза, 29-30 октября 2010 г.): сборник статей. – Пенза : Приволжский Дом знаний, 2010. – С. 94–96.

76. Макушева О. С. Разработка контактных устройств для увеличения производительности колонных аппаратов / О. С. Макушева, И. Р. Калимуллин, А. В. Дмитриев // XXXIX Неделя науки СПбГПУ : материалы международной научно-практической конференции. Инженерно-технические науки. Часть 1 (6-11 декабря 2010 г., г. Санкт-Петербург). – СПб : Санкт-Петербургский гос. политехн. ун-т, 2010. – С. 702–703.

77. Калимуллин И. Р. Очистка крупнотоннажных газовых выбросов промышленных предприятий в аппаратах с вихревыми контактными устройствами с односторонней сепарацией жидкости / И. Р. Калимуллин, А. В. Дмитриев, А. Н. Николаев // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Проблемы безопасности и защиты населения и территорий от ЧС (Безопасность – 2011)» (15-17 февраля 2011 г., г. Уфа) : в 2 т. Т. 2. – Уфа : ГОУ ВПО УГАТУ, 2011. – С. 301-305.

78. Макушева О. С. Охлаждение оборотной воды в контактных устройствах вихревого типа / О. С. Макушева, А. В. Дмитриев, А. Н. Николаев // Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием «Проблемы безопасности и защиты населения и территорий от ЧС (Безопасность – 2011)» (15-17 февраля 2011 г., г. Уфа) : в 2 т. Т. 2. – Уфа : ГОУ ВПО УГАТУ, 2011. – С. 314-318.

79. Дмитриев А. В. Проектирование аппаратов с вихревыми устройствами с учетом изменения высоты слоя жидкости на ступени / А. В. Дмитриев, И. Р. Калимуллин, А. Н. Николаев // Международная научная конференция «Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-24» (г. Киев, 31 мая-3 июня 2011 г.): сборник трудов. – Киев : Киевский политехнический институт, 2011. – С. 106-107.

Прочие публикации

80. Дмитриев А. В. Очистка газовых выбросов промышленных установок в аппаратах с интенсивным гидродинамическим режимом / А. В. Дмитриев, Д. Н. Латыпов, Н. А. Николаев // Материалы межрегиональной научно-практической конференции «Инновационные процессы в области образования, науки и производства». – Нижнекамск, 2004. – С. 203-206.

81. Дмитриев А. В. Способы снижения содержания оксидов азота в газах

- теплоэлектростанций / А. В. Дмитриев, Д. Н. Латыпов, А. Н. Николаев // Деп. в ВИНТИ. рег. № 789–В2004, 12. 05. 04. – 16 с.
82. Дмитриев А. В. Методы очистки газовых выбросов теплоэлектростанций от диоксида серы / А. В. Дмитриев, Д. Н. Латыпов, Н. И. Багаутдинов, А. Н. Николаев // Деп. в ВИНТИ. рег. № 819–В2004, 14. 05. 04. – 17 с.
83. Дмитриев А. В. Закономерности массопереноса в вихревом аппарате при физической сорбции / А. В. Дмитриев, Д. Н. Латыпов, Н. И. Багаутдинов, А. Н. Николаев // Деп. в ВИНТИ. рег. № 820–В2004, 07. 09. 04. – 22 с.
84. Смолин Д. В. Динамика дисперсной жидкой фазы в вихревых аппаратах / Д. В. Смолин, А. В. Дмитриев, Д. Н. Латыпов, А. А. Овчинников // Деп. в ВИНТИ. рег. № 1451–В2004, 07. 09. 04. – 13 с.
85. Смолин Д. В. Анализ дисперсности жидкой фазы в вихревых аппаратах / Д. В. Смолин, А. В. Дмитриев, Д. Н. Латыпов, А. А. Овчинников // Деп. в ВИНТИ. рег. № 1450–В2004, 07. 09. 04. – 6 с.
86. Дмитриев А. В. Моделирование хемосорбционного процесса в полом вихревом аппарате / А. В. Дмитриев, Д. Н. Латыпов, А. Н. Николаев // Межвузовская научно-практическая конференция студентов и аспирантов «Актуальные проблемы образования, науки и производства». – Нижнекамск, 2006. – С. 24-26.
87. Ежов П. В. Динамика газожидкостного потока в вихревой камере / П. В. Ежов, А. В. Дмитриев, Н. А. Николаев // Труды Академэнерго. – 2007. – № 3. – С. 47-51.
88. Овчинников А. А. Формирование течения газа в вихревой камере / А. А. Овчинников, П. В. Ежов, А. В. Дмитриев, Н. А. Николаев // Труды Академэнерго. – 2007. – № 4. – С. 32-38.
89. Зиганшин М. Г. Расчеты степени очистки аэрозоля в аппаратах с инерционным принципом осаждения и вращательным движением потока / М. Г. Зиганшин, А. В. Дмитриев // Деп. в ВИНТИ. рег. № 644–В2008, 24. 07. 08. – 24 с.
90. Ежов П. В. Определение удельной поверхности контакта фаз в вихревой камере / П. В. Ежов, А. В. Дмитриев // Актуальные проблемы современной науки : сборник научных работ и сообщений. – Казань : Казан. гос. технол. ун-т, 2008. – С. 3-4.
91. Калимуллин И. Р., Дмитриев А. В. // Актуальные проблемы современной науки : сборник научных работ и сообщений. – Казань : Казан. гос. технол. ун-т, 2008. – С. 3-4.
92. Гумерова Г. Х. Porous rotary liquid sprayers for cleaning gas pollutions / Г. Х. Гумерова, А. В. Дмитриев, Н. А. Николаев // Труды Академэнерго. – 2008. – № 4. – С. 34-43.
93. Гумерова Г. Х. Динамика кольца жидкости на внутренней стенке пористого вращающегося распылителя / Г. Х. Гумерова, А. В. Дмитриев, Н. А. Николаев // Деп. в ВИНТИ. рег. № 869–В2008, 10. 11. 08. – 17 с.
94. Макушева О. С. Оценка интенсивности турбулентности в массообменных аппаратах с высокой пропускной способностью / О. С. Макушева, О. А. Коньков, А. В. Дмитриев // Инновации и высокие технологии XXI века :

материалы Всероссийской научно-практической конференции (28-30 апреля 2009 г., г. Нижнекамск) : в 2 т. Т. 1 / под ред. В. И. Елизарова, М. А. Закирова. – Нижнекамск : Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) КГТУ, 2009. – С. 45-46.

95. Kon'kov O. A. Turbulent migration of finely disperse suspensions in vortex chambers / O. A. Kon'kov, P. V. Ezhov, A. V. Dmitriev, N. A. Nikolaev // Chemical and Petroleum Engineering. – 2009. – V. 45. – № 5-6. – P. 336-344.

96. Ziganshin M. G. Equipment and working conditions for comprehensive treatment of discharges containing halogen-bearing pollutants / M. G. Ziganshin, A. M. Ziganshin, A. V. Dmitriev // Chemical and Petroleum Engineering. – 2009. – V. 45. – № 3-4. – P. 230-235.

97. Dmitriev A. V. Profile analysis of blades in a vortical mass-exchange vessel with porous rotating sprayers / A. V. Dmitriev, N. A. Nikolaev // Chemical and Petroleum Engineering. – 2009. – V. 45. – № 9-10. – P. 591-595.

98. Dmitriev A. V. Variation of liquid level in stages of mass-transfer unit with direct-flow/vortical contact devices / A. V. Dmitriev, I. R. Kalimullin, A. N. Nikolaev // Chemical and Petroleum Engineering. – 2010. – V. 46. – № 7-8. – P. 446-450.

99. Makusheva O. S. Vortical chamber for cleaning gases emitted by industrial establishments / O. S. Makusheva, A. V. Dmitriev, N. A. Nikolaev // Chemical and Petroleum Engineering. – 2010. – V. 46. – № 5-6. – P. 330-333.

100. Dmitriev A. V. Distribution of liquid phase in column mass-transfer equipment with a regular packing / A. V. Dmitriev, K. V. Dmitrieva, A. N. Nikolaev // Chemical and Petroleum Engineering. – 2011. – V. 47. – № 1-2. – P. 87-92.

101. Kon'kov O. A. Dynamics of disperse phase in vortex vessels with percussive-pneumohydraulic sprayers / O. A. Kon'kov, A. V. Dmitriev, A. N. Nikolaev // Chemical and Petroleum Engineering. – 2011. – V. 47. – № 1-2. – P. 93-96.

102. Dmitriev A. V. Contact mass exchanger to increase output of active tower units / A. V. Dmitriev, O. S. Makusheva, K. V. Dmitrieva, A. N. Nikolaev // Chemical and Petroleum Engineering. – 2011. – V. 47. – № 5-6. – P. 319-323.

Сонскатель

А.В. Дмитриев

Подписано в печать 02.02.2012. Формат 60х90 1/8.
Тираж 100 экз. Гарнитура «Таймс». Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 2,0. Заказ № 02/197. Печать ризографическая.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в издательстве «ИГМА-пресс»

ИП Маликовой И.Г. ОГРН 308169031500136

Казань, ул. Московская, д.31, офис 215. Тел. 526-03-69.